doi:10.11676/qxxb2018.046 气象学报

江淮流域梅雨期气候对全球气候变暖的响应*

吴楚樵 刘玉芝 贾 瑞 邵天彬 汪 兵
WU Chuqiao LIU Yuzhi JIA Rui SHAO Tianbin WANG Bing

半干旱气候变化教育部重点实验室,兰州大学,兰州,730000
Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, *Lanzhou University*, *Lanzhou* 730000, *China*
2017-12-25 收稿,2018-05-18 改回.

吴楚樵,刘玉芝,贾瑞,邵天彬,汪兵. 2019. 江淮流域梅雨期气候对全球气候变暖的响应. 气象学报,77(1):84-99
Wu Chuqiao, Liu Yuzhi, Jia Rui, Shao Tianbin, Wang Bing. 2019. Response of climate during the Meiyu period over the Yangtze-Huai River Valley to global warming. *Acta Meteorologica Sinica*, 77(1):84-99

Abstract In the context of global warming, the climate over the Yangtze-Huai River Valley (YHRV, 28°-34°N, 110°-122°E) of China tends to be more complicated. The climate prediction during the Meiyu period over the YHRV is a scientific issue that needs to be solved urgently. We investigate the response of the climate during the Meiyu period over the YHRV in recent decades in this study. Through assessing the performance of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) models over the YHRV Region, the surface air temperature and precipitation over this region during the 21 century are predicted under the RCP4.5 and the RCP8.5 scenarios basing on simulations of 22 CMIP5 models. The related mechanism is studied as well. The result shows that under the background of global warming, climate in the YHRV during the Meiyu period has been undergoing corresponding changes. The surface air temperature during the Meiyu period over the YHRV shows an increasing trend at the rate of 0.40℃/(10 a), and the precipitation adjusts correspondingly at the same time. The precipitation becomes relatively more in the warm years but less in the cold years. With global warming in the future, averaged temperature and precipitation during the Meiyu period over the YHRV would further increase, and the spatial distribution of precipitation would become more inhomogeneous.
Key words Global warming, The Meiyu period, YHRV, CMIP5 Models, Estimate

摘 要 在全球气候变暖背景下,中国江淮流域梅雨期的气候响应趋于复杂,给江淮流域梅雨期的气候预测带来了更多的不确定因素。研究江淮梅雨期气候对全球变暖的响应,对于认识江淮梅雨变化新趋势、提高新气候背景下的汛期预报及制定防灾减灾政策均有深远意义。采用中国地面气温和降水日值数据集对近几十年来江淮地区梅雨期的气温和降水变化进行了深入分析,基于观测结果,评估了国际耦合模式比较计划第5阶段(CMIP5)的22个模式结果,并对CMIP5模式预估的21世纪中排放(RCP4.5)和高排放(RCP8.5)情景下中国江淮流域梅雨期的气温和降水变化进行了分析,并对梅雨期气候变化的机理进行了探讨。研究结果表明,在全球变暖背景下,江淮地区梅雨期气候亦发生了相应的变化,气温呈现出显著的升高趋势,降水亦发生了相应调整,在较暖年降水偏多,较冷年降水偏少。在未来全球进一步变暖的背景下,江淮地区梅雨期平均气温进一步升高,降水进一步增多,且随着排放量的增加,降水的空间分布不均匀性也在加剧。
关键词 全球变暖,梅雨,江淮地区,CMIP5模式,预估
中图法分类号 P467

* 资助课题:国家自然科学基金项目(91744311、91737101和41475095)、111引智基地项目(B13045)、兰州大学中央高校基本科研业务费专项(lzujbky-2017-63)。
作者简介:吴楚樵,主要从事大气物理、气候变化研究。E-mail: wuchq16@lzu.edu.cn
通信作者:刘玉芝,主要从事大气物理、气候变化研究。E-mail: liuyzh@lzu.edu.cn

1 引 言

近百年来,随着人类活动的加剧,全球气候变暖已成为不争的事实。根据 IPCC 第 5 次科学评估报告(IPCC,2013),1880—2012 年,全球平均升温 0.85℃,过去的 30 年是近 1400 年来中最暖的 30 年。全球气候的持续变暖,必将引起水循环发生变化,进而使得水资源在时空上重新分配(Serrano,et al,1999)。IPCC(2013)报告指出,在过去几十年,全球水循环和降水的时空格局发生了巨大变化,大部分地区发生强降水的强度或频率均有所增加。此外,报告也指出,近年来的气候变暖在很大程度上与人类活动有关(IPCC,2007,2013)。在全球变暖背景下,升温可加速水分循环,改变降水的时空分布及强度,对区域天气、气候产生影响。Trenberth(2005)指出,地面气温的升高,一方面会使地表蒸发加剧,有利于大气持水能力的增强,意味着形成降水的可能性增大;另一方面,地表蒸发加剧易导致局地干旱,使降水的空间分布不均匀可能性增大。随着全球气候的变暖,江淮流域梅雨期气候发生了新的变化(徐群,2007;丁一汇等,2007)。明确江淮地区梅雨期气温和降水对全球气候变暖的响应,不仅是该地区天气、气候预测的需要,也是拟定该地区防灾减灾政策的科学依据。

中国江淮地区受季风影响,暴雨、洪涝灾害频发,是中国受涝面积最大的地区(叶笃正等,1996)。江淮梅雨是发生在中国江淮流域的重要天气、气候现象,该地区 6—7 月的旱涝灾害大部分是梅雨异常引起的。影响梅雨的因子很多,陶诗言(1988)发现东亚季风系统成员的位置会影响江淮流域的入梅时间及梅雨持续天数。东亚夏季风环流偏弱时,江淮流域是典型的涝年,反之,旱年居多(Zhang, et al, 1999; Huang, et al, 2000)。龚道溢等(2002)发现前期的北极涛动与江淮流域夏季降水联系密切。江淮梅雨还与前期太平洋海温有关,厄尔尼诺年江淮地区夏季降水偏多,拉尼娜年降水偏少(梁萍等,2008;钱维宏等,2009)。此外,青藏高原的热力状况对江淮梅雨也有不可忽视的影响(朱玉祥等,2007)。

江淮梅雨期的划分指标因地区、研究目的及划分侧重点的差异迄今尚无统一标准。周曾奎(1996)提出,以暖湿气流、西太平洋副高脊线位置,辅以西风带环流的调整来确定出入梅日期。徐群(2007)根据长江中下游 5 站日降水资料,结合天气要素及西太平洋副高脊线位置等划分了长江中下游的梅雨期。胡娅敏等(2008)利用 Cressman 插值方法得到降水格点资料,定义了一个广义的梅雨评定标准。Zhu 等(2008)选取江淮流域代表站点计算出入梅日期的区域平均,定义了一个长江中下游入梅指数(RMOI)。梁萍等(2010)通过江淮区域梅雨的大范围持续性特征划分了江淮区域梅雨的特征量。中国气象局预报与网络司于 2014 年推出了较为全面并符合气候学意义的《梅雨监测业务规定》①,有望在将来的业务中得以推广。

针对江淮地区梅雨期气候对全球气候变暖的响应,已有研究者基于观测资料进行了相应研究。总体研究表明,气候变暖以来,江淮地区梅雨期的气温升高,降水特征趋于复杂,极端降水频次增多,非典型程度增加(陈旭,2015)。梅雨期雨带向北偏移(胡娅敏等,2009;司东等,2010;孙玉婷,2014),淮河流域频繁出现严重的暴雨洪涝灾害(陈菊英等,2007),而长江中下游则降水偏少(Wei, et al,2009),汛期预测的难度增大。亦有学者利用区域气候模式对江淮流域梅雨进行模拟(公颖,2004;司东等,2009;沈瑱等,2011;吴蓉等,2012),发现总体而言,模式对梅雨期降水带位置和同期大气环流基本特征的模拟较为合理。

目前,基于气候模式模拟结果对江淮流域梅雨的精细化评估和预估仍不多见。本研究利用江淮地区及全球范围的近地面气温和降水的观测资料,分析了气候变暖背景下中国江淮流域梅雨期气候的变化特征,并利用 CMIP5 中的 22 个模式模拟结果,评估了模式对该地区历史时期气温和降水变化的模拟性能,进而对 21 世纪中排放(RCP4.5)和高排放(RCP8.5)情景下模式模拟的该区域梅雨期温度和降水的变化特征进行分析,并从大气环流、水汽输送方面对梅雨期气候变化的机理进行了探讨,以期提高对中国江淮梅雨期气候时空变化的认识,为制定该地区响应全球气候变暖的适应对策提供科学依据。

① 中国气象局预报与网络司. 2014. 关于印发《梅雨监测业务规定》的通知(气预函(2014)28 号)。

2 资料与方法

2.1 观测资料与 CMIP5 模式资料

江淮地区气温及降水资料采用中国国家气象信息中心提供的地面气温和降水日值 0.5°×0.5°格点数据集(V2.0)进行分析。全球气温及降水资料采用英国 East Anglia 大学 Climatic Research Unit(简称 CRU)提供的数据集 CRU-TS3.21。为探讨江淮地区梅雨期间气温及降水变化的可能原因,采用了美国 NCEP/NCAR 提供的风场资料及欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的水汽通量场再分析资料。

在利用 CMIP5 模式模拟结果分析过程中,考虑不同模式分辨率的差异,且由于文中所研究的江淮地区范围较小,需要分辨率统一且精度较高的模式资料进行研究。CMIP5 包括全球大约 28 个研究机构或组织的 65 个模式资料(Taylor, et al, 2012),文中采用 Feng 等(2014)通过降尺度处理的 22 个 CMIP5 耦合模式(表 1)的模拟结果进行分析评估。这 22 个 CMIP5 模式的试验结果中包含 CMIP5 在历史情景(Historical)、所有驱动因子(all-forcing)及中、高排放典型浓度路径(RCP4.5、RCP8.5)下未来情景预估的全部试验,相对较为全面。降尺度过程中,主要基于大气环流模式(GCM)的原始输出结果,对其距平值进行薄板样条插值(Delta 方法),将其插值到 GCM 网格中心,然后应用到高精度网格上。降尺度后 22 个模式水平分辨率统一为 0.5°×0.5°。历史气候选取 1961—2005 年逐月平均气温和降水的模拟结果,并分析了 RCP4.5 和 RCP8.5 两种排放情景下模式对 2006—2100 年逐月平均气温和降水的预估结果。其中 RCP4.5 代表中低排放情景,指 2100 年辐射强迫稳定在 4.5 W/m^2,RCP8.5 代表高排放情景,指 2100 年辐射强迫达到 8.5 W/m^2(Moss, et al, 2010)。

表 1 22 个 CMIP5 气候模式概况

Table 1 Brief description of the 22 CMIP5 Models used in this study

	模式名称	模式水平分辨率	研究单位及所属国家
1	BCC-CSM1.1	2.815°×2.815°	Beijing Climate Center, China
2	CanESM2	2.815°×2.815°	Canadian Centre for Climate, Canada
3	CCSM4	1.25°×0.9°	National Center for Atmospheric Research, USA
4	CESM1-BGC	1.25°×0.9°	National Center for Atmospheric Research, USA
5	CMCC-CM	0.75°×0.75°	Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti, Italy
6	CMCC-CMS	1.875°×1.875°	Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti, Italy
7	CNRM-CM5	1.40°×1.40°	Centre National de Recherches Meteorologiques, France
8	CSIRO-Mk3.6	1.875°×1.875°	Commonwealth Scientific and Industrial Research, Australia
9	FGOALS-g2	2.815°×3.0°	Institute of Atmospheric Physics, CAS, China
10	GFDL-CM3	2.5°×2.0°	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA
11	GFDL-ESM2G	2.5°×2.0°	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA
12	GFDL-ESM2M	2.5°×2.0°	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA
13	GISS-E2-H	2.5°×2.0°	NASA Goddard Institute for Space Studies, USA
14	HadGEM2-CC	1.875°×1.25°	Met Office Hadley Centre, UK
15	HadGEM2-ES	1.875°×1.25°	Met Office Hadley Centre, UK
16	INM-CM4	2.0°×1.5°	Institute for Numerical Mathematics, Russia
17	IPSL-CM5A-MR	2.5°×1.25°	Institut Pierre-Simon Laplace, France
18	MIROC5	1.40°×1.40°	Atmosphere and Ocean Research Institute, Japan
19	MIROC-ESM	2.815°×2.815°	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan
20	MPI-ESM-LR	1.875°×1.875°	Max Planck Institute for Meteorology, Germany
21	MRI-CGCM3	1.125°×1.125°	Meteorological Research Institute, Japan
22	NorESM1-M	2.5°×1.875°	Norwegian Climate Centre, Norway

2.2 研究方法

采用简单线性回归计算过去及未来江淮地区梅雨期气温和降水量的变化趋势。在基于 22 个 CMIP5 耦合模式模拟结果的分析中,采用等权重系数条件下计算的多模式集合平均结果(MME)代表 CMIP5 的模拟结果。研究表明,在 CMIP 多模式模拟结果的分析研究中,多模式集合平均结果更加可信,集合平均的结果优于绝大多数单个模式(Mee-

hl, et al, 2007;Jiang, et al, 2013;Chen,2013),因此被广泛应用(姚遥等,2012; Xie, et al, 2016)。采用距平百分率反映某一时段气温及降水与同期平均状态的偏离程度,用以研究 CMIP5 模式模拟结果与观测结果的差异,评估 CMIP5 模式模拟性能。

由于江淮流域梅雨基本发生在 6、7 月,选用江淮地区 6、7 两个月的平均气温及平均降水量作为江淮地区梅雨期的平均气温及降水,以便与后文中 CMIP5 模式数据进行对应比较。在评估模式与未来气候的趋势分析时,将 1986—2005 年作为气候平均态。同时,对于 2006—2100 年的未来气候,分为 21 世纪早期(2016—2035 年),中期(2046—2065 年)和末期(2081—2100 年)3 个阶段,分析各阶段梅雨期逐年气温和降水。

此外,为了评估通过降尺度方法得到的模式集合平均对区域梅雨的模拟效果,采用距平相关系数以评估模拟场与观测场的相似程度

$$R_{\mathrm{ACC}}=\frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(F_i-\overline{F})(O_i-\overline{O})}{\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(F_i-\overline{F})^2\cdot\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(O_i-\overline{O})^2}} \tag{1}$$

式中,N 为空间场的格点样本数,F_i 为第 i 个样本的预测值,O_i 为第 i 个样本的观测值。$\overline{F}$ 为 N 个样本预测值的平均,$\overline{O}$ 为 N 个样本观测值的平均。

3 结果分析

3.1 江淮流域梅雨期历史时期气候变化的观测及模拟

从 1961—2005 年全球和江淮地区年平均气温与降水距平的时间序列(图 1)可以看出,1961—1979 年,全球年平均气温呈上升趋势(0.02℃/(10 a)),江淮地区年平均气温则呈弱的下降趋势(−0.09℃/(10 a))。1980 年后,相对于全球年平均气温以 0.38℃/(10 a)的速率上升,江淮地区年平均气温的上升趋势更加明显(0.86℃/(10 a)),并在 2005 年达到历史最高值(图 1a),这与 IPCC(2013)科学评估报告中所指出的全球气候变暖的转折年份基本一致。由 1961—2005 年全球年平均降水与江淮地区年平均降水距平的比较(图 1b)可以看出,全球年平均降水在全球变暖前后的差异并不显著,且未表现出明显的线性变化趋势;而江淮地区年平均降水量在全球变暖之后较全球变暖前有明显的增加,且增加趋势在 1980 年后(3.05 mm/(10 a))较 1980 年前(−3.85 mm/(10 a))显著。

从1961—2005年全球和江淮地区6—7月平均

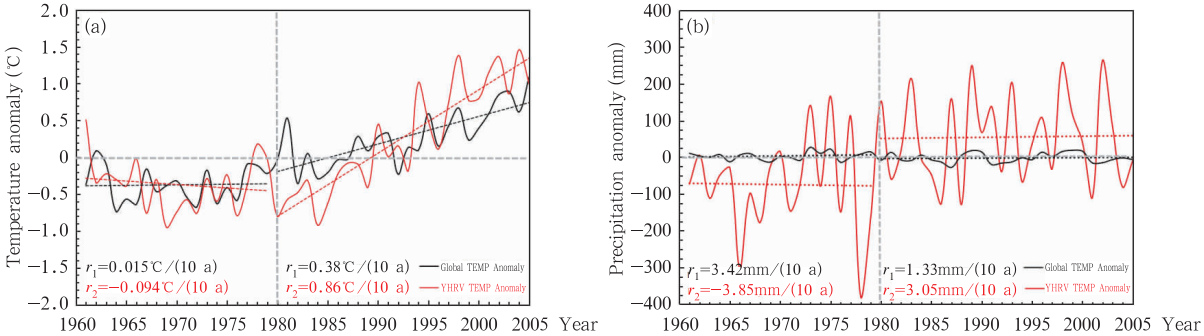

图 1 1961—2005 年全球和江淮地区年平均气温(a)与降水(b)距平的时间序列

(黑色实线表示全球平均的气温/降水距平,红色实线表示江淮地区区域平均的气温/降水距平,黑色虚线表示全球平均气温/降水距平的线性拟合,红色虚线表示江淮地区区域平均气温/降水距平的线性拟合,r_1,r_2 分别表示 1961—1979 年及 1980—2005 年两个时段的气温/降水变化速率)

Fig. 1 Time series of annual mean temperature (a) and precipitation (b) anomalies over the globe and in the YHRV from 1961 − 2005

(The black solid lines represent time series of globally averaged anomalies, the red solid lines represent the averaged anomalies over the YHRV, the black and red dotted lines represent the simple linear trends of anomalies averaged over the globe and the YHRV, respectively. r_1 and r_2 represent the decadal variations during the periods 1961 − 1979 and 1980 − 2005, respectively)

气温与降水距平的时间序列(图 2)可以看出,1961—1979 年,全球 6—7 月平均气温呈缓慢上升趋势(0.02℃/(10 a)),江淮地区的气温则呈显著下降趋势(－0.59℃/(10 a))。1980 年后,全球 6—7 月平均气温显著上升,速率为 0.62℃/(10 a),江淮地区梅雨期气温上升趋势与全球变化速率大致相同(0.40℃/(10 a))(图 2a)。从 1961—2005 年全球和江淮地区 6—7 月平均降水距平序列(图 2b)可以看出,全球 6—7 月平均的降水无显著变化,而江淮地区梅雨期平均降水总体呈上升趋势,降水量在全球变暖(1980 年)之后有所增大,但增加速率变缓,从 1980 年前的 12.03 mm/(10 a)变为 1980 年之后的 2.06 mm/(10 a)。

从1961—2005年中筛选具有全球代表性的5个

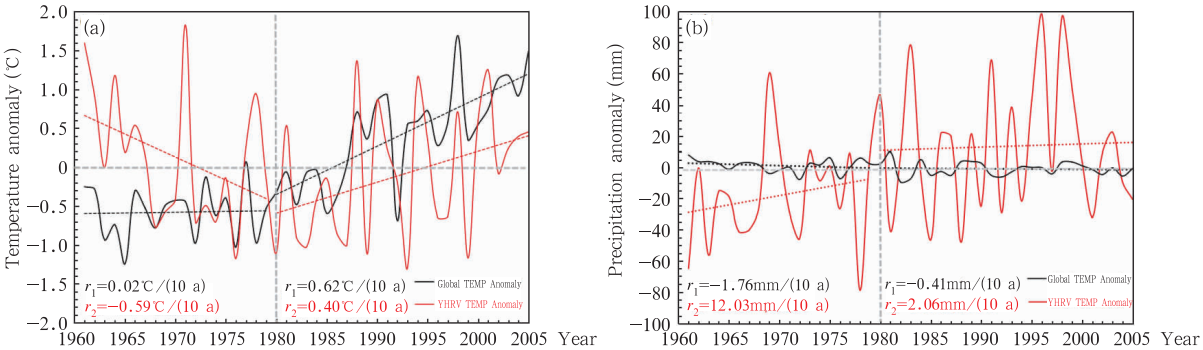

图 2 1961—2005 年全球和江淮地区 6—7 月平均气温(a)及降水(b)距平的时间序列

(黑色实线表示全球平均的气温/降水距平,红色实线表示江淮地区区域平均的气温/降水距平,黑色虚线表示全球平均气温/降水距平的线性拟合,红色虚线表示江淮地区区域平均气温/降水距平的线性拟合,r_1,r_2 分别表示 1961—1979 年及 1980—2005 年两个时段的气温/降水变化速率)

Fig. 2 Time series of temperature (a) and precipitation (b) anomalies in the global and the YHRV during June－July from 1961－2005

(The black solid lines represent time series of globally averaged anomalies, the red solid lines represent the anomalies averaged over the YHRV, the black and red dotted lines represent the simple linear trends of anomalies over the global and the YHRV, respectively. r_1 and r_2 represent the decadal variations during the periods 1961－1979 and 1980－2005, respectively)

最冷年和 5 个最暖年进行分析(表 2)。其中,最冷的 5 年分别为 1964、1966、1972、1974 和 1976 年,最暖的 5 年分别为 1995、1998、2002、2003 和 2005 年,选取的冷、暖年代表全球变暖前后两个典型的时期。1961—2005 年江淮地区梅雨期的平均气温为 24.50℃,平均降水量为 189.26 mm。由表 2 可见,在全球气温相对最低的 5 年,梅雨期的平均气温为 24.33℃,降水量为 161.71 mm,其梅雨期的平均气温及降水量均低于 1961—2005 年江淮地区梅雨期平均气温及降水量。而在全球平均气温最高的 5 年,情况恰好相反,暖年梅雨期的平均气温为 24.84℃,降水量为 219.42 mm,梅雨期气温及降水量均高于 1961—2005 年江淮地区梅雨期的平均值。可以看出,冷年多集中在1980年之前,气温及降水

表 2 全球冷、暖年江淮地区的气温及降水差异

Table 2 Differences in temperature and precipitation between cold and warm years over the YHRV

冷年	梅雨期温度(℃)	梅雨期降水(mm)	暖年	梅雨期温度(℃)	梅雨期降水(mm)
1964	25.68	173.91	1995	24.85	232.45
1966	25.04	147.95	1998	25.21	285.98
1972	23.79	143.45	2002	24.43	198.59
1974	23.8	180.65	2003	24.75	211.66
1976	23.33	162.57	2005	24.96	168.42
冷年平均	24.33	161.71	暖年平均	24.84	219.42

距平多为负距平,总体而言气温偏低,降水偏少。暖年多集中在1980年之后,气温及降水距平多为正距平,总体而言气温偏高,降水偏多。可见,全球变暖之后,江淮地区梅雨期气温及降水呈现增加趋势,变化幅度较为明显。

利用中国国家气象信息中心提供的全国气温和降水日值格点资料进行对比,进一步评估了CMIP5模式对江淮地区梅雨期气温和降水的模拟性能。图3为22个CMIP5模式与中国气象局(CMA)格点资料得到的1961—2005年梅雨期平均气温和降水的对比,可见各模式模拟的梅雨期平均气温均略低于观测值,其范围均在5%左右,个体差异不大。模式模拟的梅雨期平均降水均略高于实测降水,其中降水均值最高的为CMCC-CM模式(165.89 mm),高出观测值约14%,最低的为CCSM模式(146.97 mm),高出观测值约1%。

从观测和CMIP5的22个模式集合平均的1961—2005年梅雨期平均气温的空间分布(图4)可以看出,江淮地区梅雨期平均气温呈现由南向北逐渐降低的分布特征,在江淮地区西部存在低值区(图4a)。而模式集合平均模拟的江淮地区气温也呈现由南向北递减的分布特征,而且江淮地区西部、安徽西部及安徽与浙江交界处的数个低值区模拟均较好(图4b)。模式集合平均模拟的多年平均温度空间分布与观测值距平相关系数为0.96,模拟场与观测场的吻合程度较高,模拟效果良好。从观测的

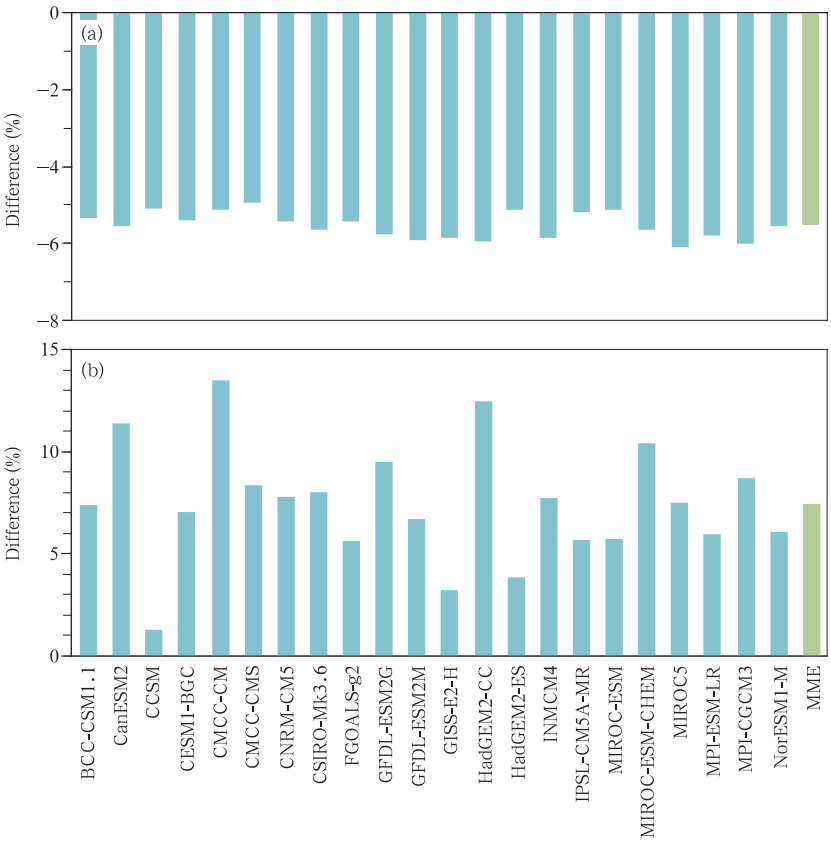

图3 22个CMIP5模式模拟与CMA观测的1961—2005年梅雨期平均气温(a)和降水(b)的差异比较(单位:%)

(MME为多模式集合,蓝色柱分别表示22个模式单个模式结果,绿色柱为22个模式的集合平均MME)

Fig. 3 Differences in averaged temperature (a) and precipitation (b) between CMA observations and CMIP5 simulations during the period 1961 – 2005

(MME represents Multi-Model Ensemble, while the blue bars represent the precipitation simulated by 22 models and the green bar represents MME of the 22 models)

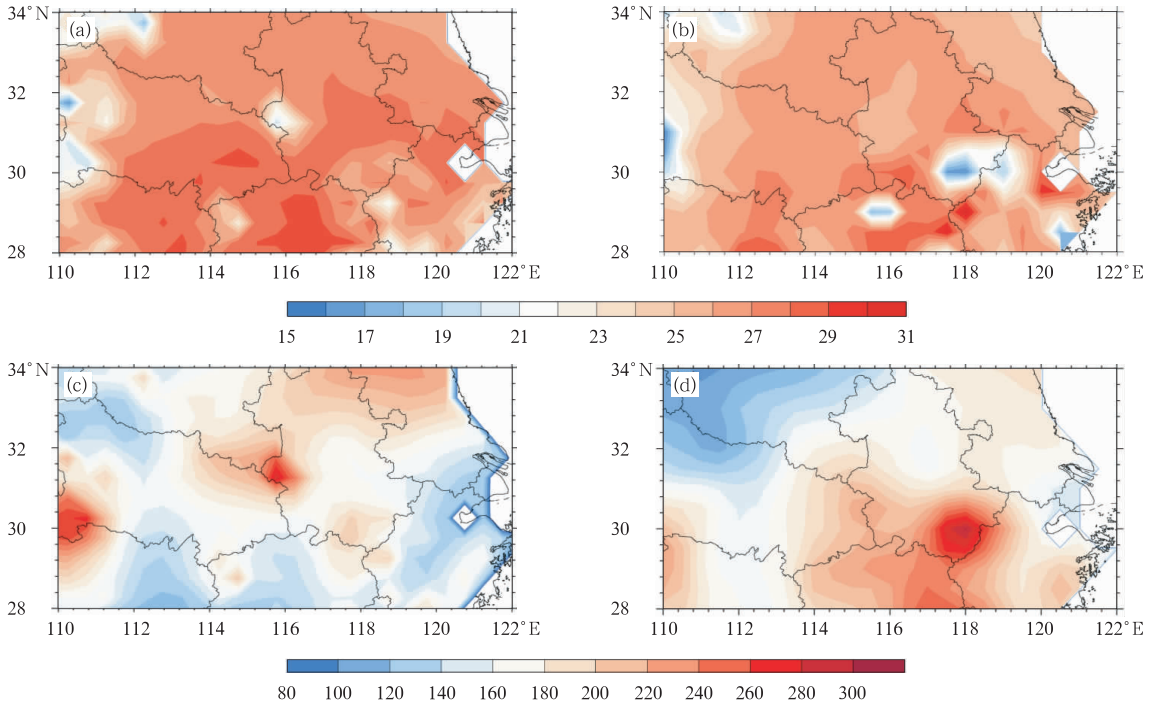

图 4 观测和模拟的 1961—2005 年江淮地区梅雨期多年平均气温(单位:℃)及降水(单位:mm)分布

(a、b. 气温,c、d. 降水,a、c. CMA 格点资料观测值,b、d. CMIP5 的 22 个模式集合平均)

Fig. 4 Distributions of temperature (unit: ℃) and precipitation (unit: mm) from observations and simulations during the Meiyu period over the YHRV

(a, b. temperature; c, d. precipitation; a, c. CMA observations; b, d. MMEs of 22 CMIP5 models)

多年平均降水的空间分布来看,江淮地区梅雨期降水在江苏北部,安徽、湖北、河南交界处,以及湖北、湖南西部均有一高值中心,呈现由东南向西北递减的地理分布型(图 4c)。模式集合平均较好地模拟出了江淮地区梅雨期在江苏北部,安徽、湖北、河南三省交界处,以及湖北、湖南西部的高值中心,而且也模拟出了江淮地区西北角的低值区域(图 4d)。模式集合平均模拟的空间分布与观测到的多年平均降水的空间分布距平相关系数为0.79,证明模拟场与观测场的分布相似程度较高。

全球气候变暖后,江淮流域梅雨期气候发生了新的变化。为研究气候变暖以来梅雨期气候的变化,以及检验模式组合对江淮地区历史气候变化的模拟能力,利用观测和 CMIP5 模式模拟的 1980—2005 年江淮地区梅雨期气温及降水相对于 1961—1979 年的距平百分率(((实测值 - 同期历史均值)/同期历史均值)×100%)(图 5)。CMIP5 的模拟结果为 22 个模式的集合平均结果。全球变暖后,江淮地区梅雨期气温整体呈升高趋势,升温幅度由西北向东南逐渐递减,在长三角地区及江西与湖北、安徽交界处有小范围弱的降温趋势(图 5a)。模式对气温趋势模拟的由西北向东南逐渐递减的空间分布与观测资料基本一致,对江淮西北地区气温升高的高值区模拟也较好,但模式模拟的整个江淮地区均呈升温趋势,未能准确模拟出长江三角洲区域部分降温的趋势(图 5b)。全球变暖后,江淮地区梅雨期降水整体呈增加趋势,增加幅度由南向北逐渐递减,江淮西南地区降水增加明显,而江淮地区西北部以及江苏北部部分地区呈弱的减少趋势(图 5c)。模式集合平均较好地模拟出了江淮地区南部降水的增加趋势以及江淮地区北部湖北、河南交界地区微弱的减少趋势,但未能准确模拟出江苏北部部分地区的弱的减少趋势,模式模拟的降水减少区域出现在江苏、浙江、安徽交界处(图 5d)。

总体而言,CMIP5 模式集合平均对江淮地区梅雨期降水变化趋势的空间分布模拟效果尚可,使用模式对未来江淮地区的梅雨期气候进行预估是可行的。

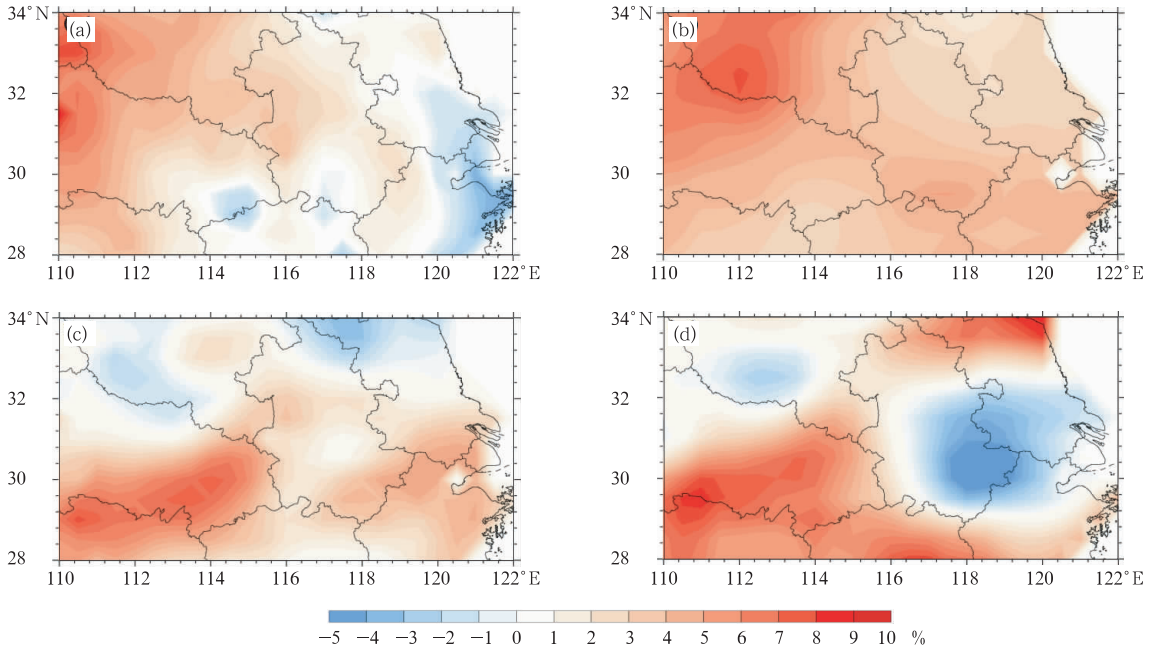

图 5 观测和模拟的 1980—2005 年江淮地区相对于 1961—1979 年江淮地区梅雨期气温及降水的距平百分率

(a、b. 气温,c、d. 降水,a、c. CMA 格点资料观测值,b、d. CMIP5 的 22 个模式集合平均)

Fig. 5 Percentage temperature and precipitation anomalies during the Meiyu period 1961 – 2005 relative to the period 1961 – 1979 over the YHRV

(a, b. temperature; c, d. precipitation; a, c. CMA observations; b, d. MMEs of 22 CMIP5 models)

综上所述,江淮地区梅雨期气温及降水与变暖前相比均呈增加趋势,且升温幅度较为明显。总体而言,冷年江淮地区梅雨期气温偏低,降水偏少。暖年江淮地区梅雨期气温偏高,降水偏多。就空间分布而言,全球变暖后,江淮地区梅雨期气温整体呈升高趋势,升温幅度由南向北逐渐增大。江淮地区梅雨期降水总体呈增加趋势,在北部部分地区有微弱的减少趋势。22 个 CMIP5 模式的集合平均对江淮地区梅雨期气候的平均变化趋势的空间分布模拟效果较好,使用模式对未来江淮地区的梅雨期气候进行预估具有可行性。

3.2 CMIP5 对江淮地区梅雨期未来气候的预估

为了较为直观地揭示 21 世纪江淮地区梅雨期降水在不同阶段的空间变化特征,将 21 世纪分为前期(2016—2035 年)、中期(2046—2065 年)和后期(2080—2099 年)3 个阶段,并用 22 个模式的集合平均对梅雨期降水的空间分布代表模式结果,对 CMIP5 模式对江淮地区梅雨期未来 3 个时段的气温及降水变化预估结果进行了分析。表 3 为 RCP4.5 及 RCP8.5 情景下 21 世纪前、中、后期相对 1986—2005 年气候平均态江淮地区梅雨期平均气温与降水的距平。结果表明,两种排放情景下 21 世纪江淮地区梅雨期的平均气温均呈上升趋势,且 RCP8.5 情景下的升幅远高于 RCP4.5 情景。RCP4.5 情景下,江淮地区气温的上升速率基本呈前期匀速增加、后期增长趋缓的特征(前、中、后期相较 1986—2005 年的升幅分别为 0.42、0.46 和 0.23℃/(10 a)),至 21 世纪末,相对现代而言平均升温达 2.20℃。RCP8.5 的上升速率相比 RCP4.5 要高,且在 21 世纪各个阶段呈从前至后逐渐递增的趋势(前、中、后期相较前一时期上升速度分别为0.52、0.70、0.93℃/(10 a)),至 21 世纪末,气温和升速都达到最高值,平均升温相对现代而言可达4.30℃。

两种代表性浓度路径情景下的平均梅雨期降水在江淮区域内变化均值总体而言均有增加,且 RCP4.5 情景下的增幅高于 RCP8.5 情景。在增加速率上,两个典型浓度路径情景则表现各异。RCP4.5 的降水增加速率呈前期上涨幅度较为迅速、中期涨幅较小,至后期上涨迅速的趋势(前、中、后期相较前一时期增加幅度分别为 1.37、0.1、

2.19 mm/(10 a))。RCP8.5 在 21 世纪各个阶段则呈前期减少、中期迅速增加,至后期趋于稳定的趋势(前、中、后期相较前一时期增加幅度分别为 -0.71、3.07、0.29 mm/(10 a)),21 世纪后期的年平均降雨量基本与中期持平。

图 6 给出了 RCP4.5 与 RCP8.5 情景下江淮地区在 21 世纪前、中和后期相对于 1986—2005 年气候态气温变化的分布。可以看出,江淮地区梅雨期

表 3 RCP4.5 及 RCP8.5 情景下 21 世纪不同阶段江淮地区梅雨期气温及降水距平

Table 3 Temperature and precipitation anomalies during the Meiyu period in the 21st century over the YHRV under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios

时段	气温距平(℃/(10 a))		降水距平(mm/(10 a))	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
2016—2035 年	0.4180125	0.519805	1.367625	-0.71415
2046—2065 年	0.8769825	1.21852	1.50785	2.3613
2080—2099 年	1.1011425	2.1519	3.690875	2.648

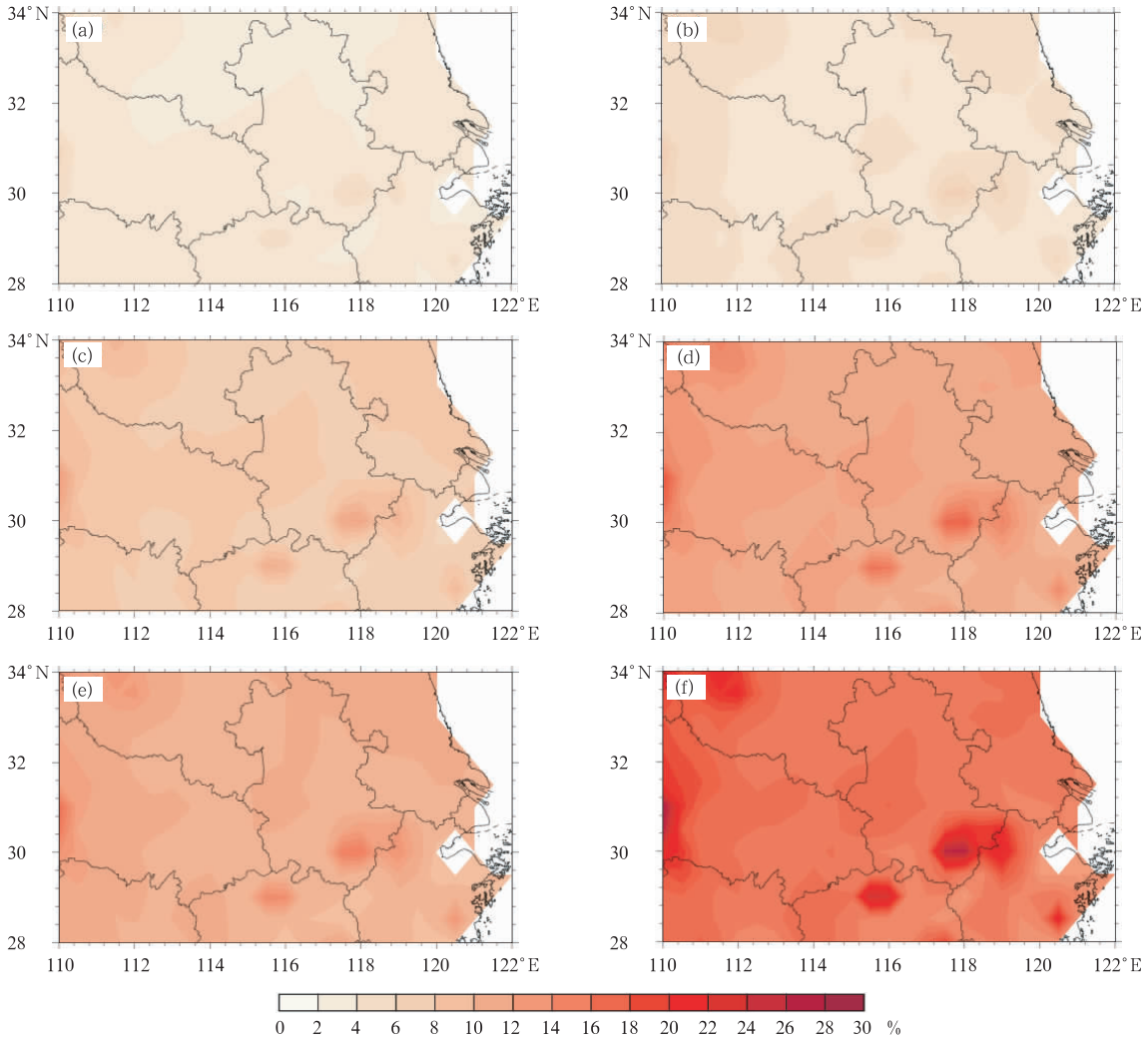

图 6 RCP4.5(a、c、e)与 RCP8.5(b、d、f)情景下 21 世纪前(a、b)、中(c、d)、后(e、f)期相对于 1986—2005 年气候态江淮地区梅雨期气温距平百分率

Fig.6 Temperature anomalies relative to the period 1986-2005 during the early stage (a, b), the metaphase (c, d) and the later stage (e, f) of the 21 century over the YHRV under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios

气温的上升是整体性的,空间分布较为均匀。在21世纪前期,RCP4.5和RCP8.5情景下江淮地区气温与1986—2005年相比整体均偏高,但两种排放情景之间的差异不大。进入21世纪中期,RCP8.5的上升速率相对RCP4.5情景下有所增强,RCP4.5的上升速率在10%—12%,RCP8.5在12%—14%,局部上升速率达到18%。21世纪后期,RCP8.5情景下江淮地区气温相对RCP4.5情景下的上升趋势更为显著,整体范围在17%—21%,局部幅度超过25%。

图7给出了RCP4.5与RCP8.5情景下江淮地区在21世纪前、中、后期相对于1986—2005年气候态降水差异的分布。可以看出,在21世纪前期,与1986—2005年相比,RCP4.5情景下江淮地区北部降水增多,南部降水较现在有减少趋势,但幅度较小。进入21世纪中期后,该地区降水的变化幅度增强,总体依旧呈现北部增多、南部减少的趋势,在江苏境内有一高值区,局部增强幅度达到6%,而南部湖北、湖南、江西交界处有一低值区。21世纪后期,江淮地区南部的降水减少区域消失,全区降水相对于现代而言均呈现显著的增加趋势。其中长江三角洲地区与江淮地区西北部河南省境内有两个增加显著的区域,增幅在7%以上。在RCP8.5情景下,21世纪前期与中期表现出与RCP4.5情景基本一致的

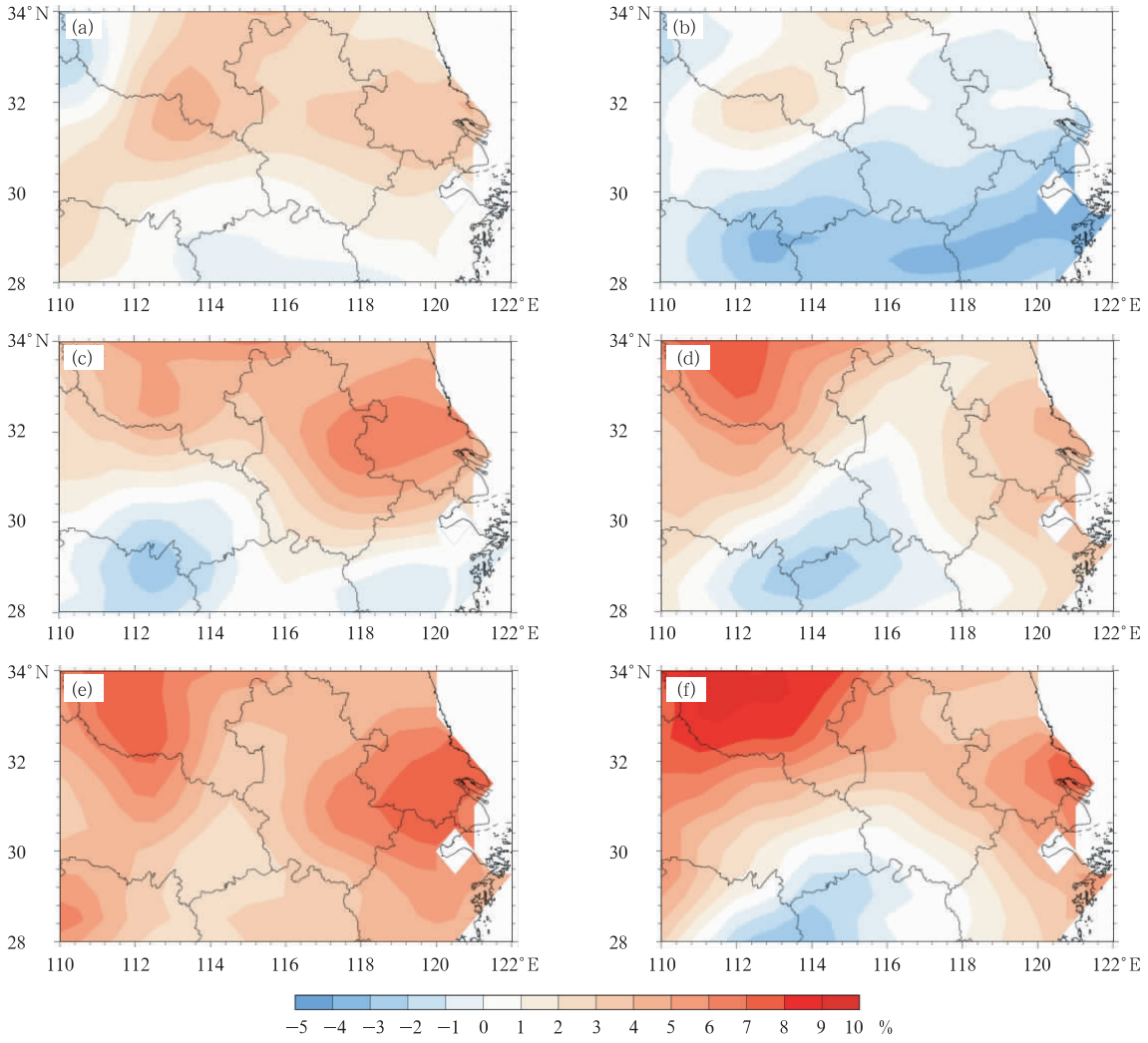

图7 RCP4.5(a、c、e)与RCP8.5(b、d、f)情景下21世纪前(a、b)、中(c、d)、后(e、f)期相对于1986—2005年气候态江淮地区梅雨期降水距平百分率

Fig. 7 Precipitation anomalies relative to 1986 – 2005 during the early stage (a, b), the Metaphase (c, d) and the later stage (e, f) in the 21st century over the YHRV under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios

空间分布特征,但在21世纪前期,RCP8.5情景下的降水较RCP4.5在江淮地区南部呈现较大范围的减少趋势。进入21世纪中期,江淮地区梅雨期降水的空间分布差异加剧,北部淮河流域主要表现为增加趋势,而南部降水依然为小幅度的减少趋势,但降水减少的范围缩小至湖北、湖南、江西交界一带,与RCP4.5情景下基本相似。21世纪后期,江淮地区梅雨期降水的空间分布不均匀性进一步增强,江淮地区西北部河南省境内降水增加显著,局部增幅达到10%。江淮地区南部降水减少的同时,北部降水明显增加。总体而言,21世纪梅雨期两种排放情景下的平均降水在江淮区域均有增大,且RCP8.5情景下的空间分布不均匀性高于RCP4.5情景。

从RCP4.5与RCP8.5情景下多模式集合对21世纪江淮地区梅雨期平均气温及降水时间序列的模拟结果(图8)可以看出,两种排放情景下21世纪江淮区域梅雨期气温均呈上升趋势,且RCP8.5情景下多模式集合的上升速率高于RCP4.5情景,其中RCP4.5情景下变化速率为0.23℃/(10 a),RCP8.5情景下变化速率为0.45℃/(10 a),其上升趋势可与图6对应。由图8b可见,21世纪江淮地区梅雨期平均降水在RCP4.5与RCP8.5情景下均有增多,且RCP4.5情景下多模式集合平均的变化速率(0.72 mm/(10 a))略高于RCP8.5情景(0.51 mm/(10 a))。但相对而言,降水并未表现出显著的线性变化趋势,这主要由于江淮地区梅雨期降水空间分布的不均匀性进一步加剧所致(图7)。

3.3 江淮地区梅雨期气候变化的机理分析

由上述分析可知,随着全球气候的变暖,江淮梅雨期的降水量有所增加。亚洲夏季风是影响夏季降水最主要的环流系统(孙颖等,2009),江淮地区梅雨期的水汽输送主要来源于孟加拉湾和中国南海地区(Murakami,1959),水汽输送很大程度上决定了该地区降水量的多少。而全球变暖可能导致亚洲夏季风环流异常,进而影响水汽输送,造成梅雨期的气候异常。因此,文中从大气环流形势及水汽输送的变化两方面对气候变暖后的季风变化特征进行分析,以探讨其对江淮地区梅雨期气候产生的可能影响。

为了更具代表性地分析气候变暖后江淮地区梅雨期的大气环流特征,仍选取表2中1961—2005年具有代表性的5个最冷年和5个最暖年进行研究,其中,暖年均在1980年后,冷年均在1980年前。并由表2可知,暖年的梅雨期降水偏多,冷年的梅雨期降水偏少。从所选的冷年、暖年梅雨期850 hPa风场矢量分布(图9)对比可以看出,江淮梅雨期冷、暖年850 hPa风场存在显著差异。冷年(图9a),偏南风相对较强,使得南亚夏季风从热带太平洋、中国南海和孟加拉湾向东亚的北支气流携带水汽输送至江淮以北地区,造成江淮地区气候偏干;暖年(图9b),南亚夏季风的偏南风较弱而偏西风较强,使得水汽

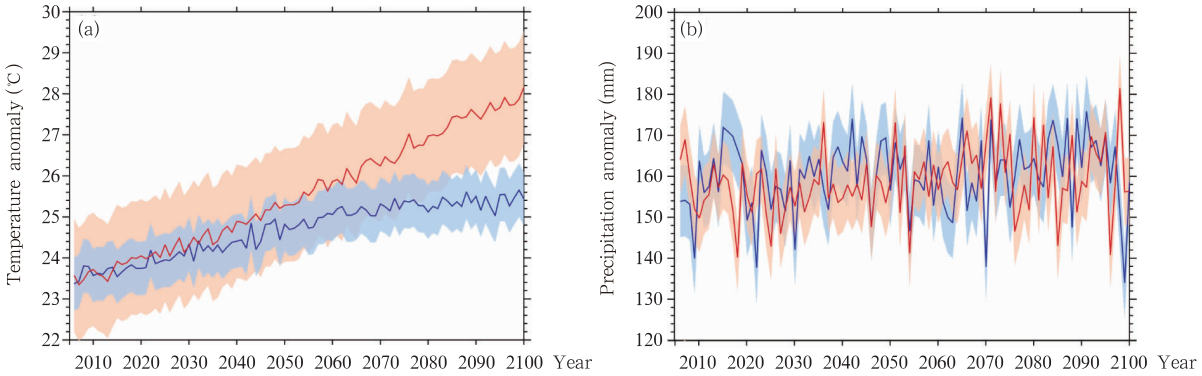

图8 RCP4.5及RCP8.5情景下2006—2100年江淮地区梅雨期气温(a)及降水(b)变化趋势预估

(蓝色线为RCP4.5,红色线为RCP8.5,阴影部分为标准偏差)

Fig. 8 Prediction of temperature (a) and precipitation (b) during the Meiyu period over the YHRV during 2006-2100 under the RCP 4.5 and RCP8.5 scenarios

(Blue and red lines represent RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, respectively; The shadings represents the standard deviation)

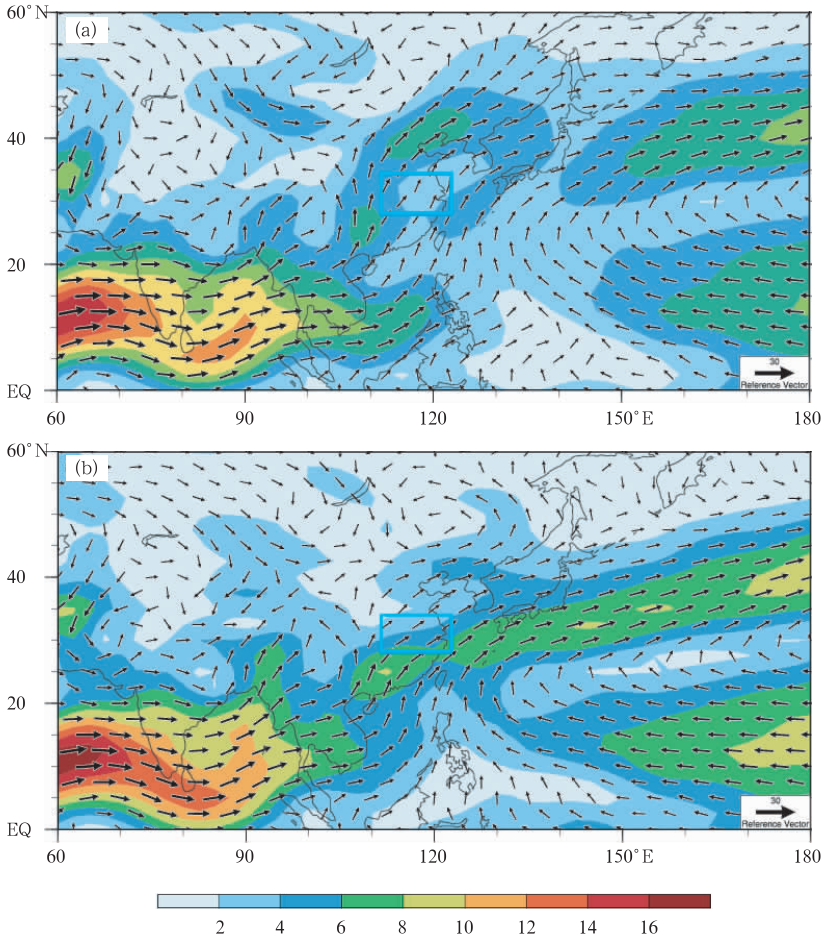

图 9 冷年(a)、暖年(b)梅雨期 850 hPa 的平均风场分布(单位:m/s)
(箭头为风矢量,色阶表示风速的绝对值,蓝框表示本研究的江淮地区范围)
Fig. 9 Spatial distributions of averaged wind vectors (arrows) and wind speed (shadings, unit: m/s) at 850 hPa during the Meiyu period in cold (a) and warm (b) years
(The arrows indicate the wind vectors, and the contours shaded in color indicate the absolute values of wind speed anomaly; The blue box denotes the area of the YHRV)

得以输送至长江流域,与此同时,西北太平洋地区的副热带反气旋西北侧的西南气流加强,较强的东亚夏季风使得来自太平洋以东南风的形式输送到江淮地区的水汽偏多,两支水汽在江淮地区汇合,共同造成了当年江淮地区气候偏湿。

南亚高压是夏季北半球对流层高层最强大且稳定的控制性环流系统,与夏季大气环流和亚洲天气、气候关系密切,对梅雨期降水影响很大。由于高层风速数值较大,单独研究冷、暖年风场矢量差异不明显,故采用冷年、暖年梅雨期 200 hPa 风场及风速距平绘图(图 10),选取 1961—2005 年为风场平均值。冷年(图 10a),青藏高原上空为气旋性距平环流,南亚高压强度减弱;副热带西风急流位置偏北、偏弱,江淮地区上空盛行的偏西风气流强度偏弱;低纬度以西风距平为主,原来盛行的东风气流较常年偏弱。暖年(图 10b),江淮地区上空的风场距平与冷年基本呈反位相变化,其上空盛行的偏西风气流强度较强;青藏高原上空为反气旋性距平环流,南亚高压强度偏强。大气环流在冷、暖年呈现出的差异,对水汽输送有着重要影响。

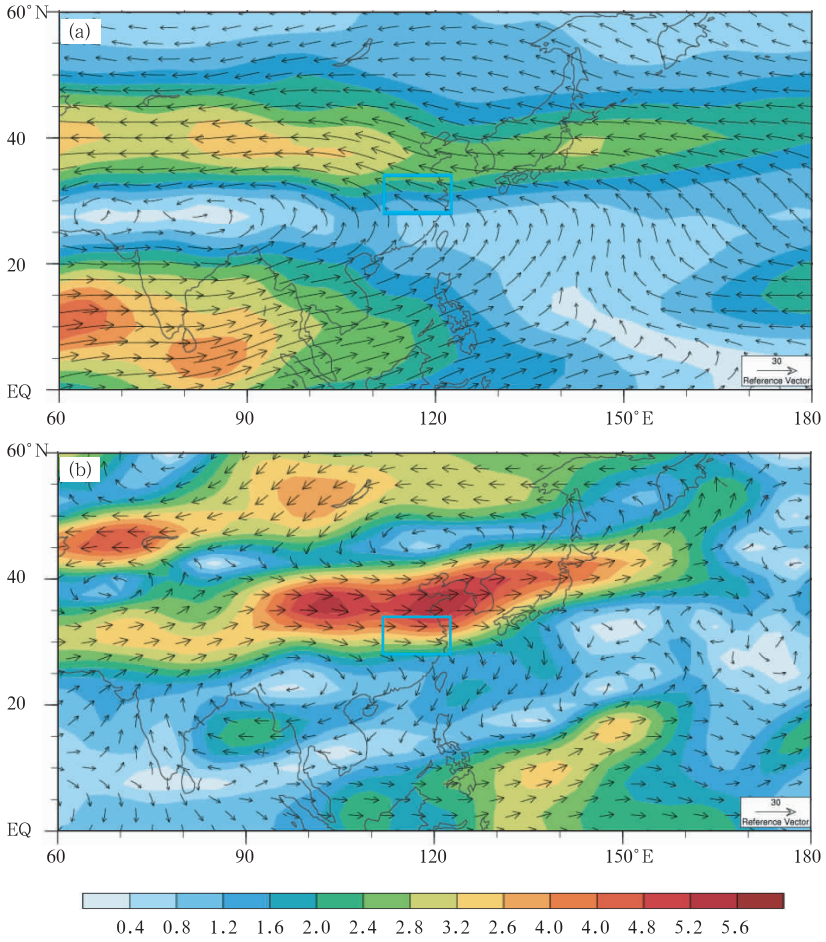

图 10 冷年(a)、暖年(b)梅雨期 200 hPa 风场距平分布(单位:m/s)
(箭头表示风矢量,色阶表示风速距平的绝对值,蓝框表示本研究的江淮地区范围)
Fig. 10 Spatial distributions of wind vectors (arrows) and anomalies of wind speed (shadings, unit: m/s) at 200 hPa during the Meiyu period in cold (a) and warm (b) years
(The arrows indicate the wind vectors, and the shadings indicate the absolute values of wind speed anomaly; The blue box denotes the area of the YHRV)

充足的水汽是江淮梅雨形成的必要条件,水汽输送在很大程度上影响着梅雨期的降水。文中分别计算了冷、暖年梅雨期水汽通量场的纬向、经向输送距平(图 11)。江淮地区梅雨期的水汽主要通过南亚季风和东亚季风经由中国南海和西太平洋输送。江淮地区的纬向水汽主要由中国南亚季风的西风气流、副高南部东亚季风的东风气流输送。冷年,纬向水汽通量距平(图 11a)中,南亚季风的西风输送较弱,副高南部的东风气流输送较强;而暖年江淮地区的纬向水汽输送(图 11c)中,南亚季风的西风输送增强,位于阿拉伯海北部的最大距平中心绝对值达 100 kg/(m·s),为江淮梅雨的异常偏多提供了充足的水汽。图 11b、d 为冷、暖年梅雨期水汽通量场的经向输送距平。可见冷年来自西太平洋北上的水汽输送相对偏强,直接作用于大部分江淮地区,最大距平中心绝对值达 60 kg/(m·s),孟加拉湾及阿拉伯海的经向输送则相对较弱;江淮地区在暖年自西太平洋北上的经向水汽输送较弱。可见,造成暖年梅雨期降水异常偏多的主要贡献在于南亚季风纬向的水汽输送,这与图 9b 相符。

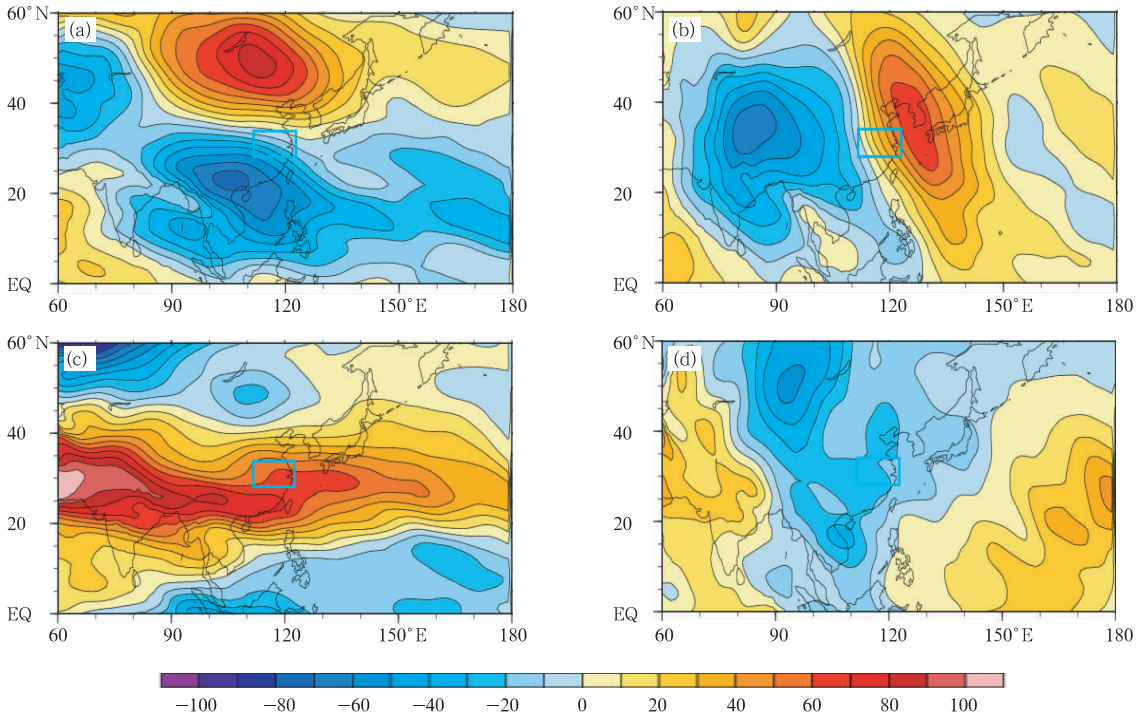

图 11 冷年(a、b)、暖年(c、d)梅雨期纬向(a、c)、经向(b、d)输送的水汽通量分布距平(单位:kg/(m·s))
(纬向向东、经向向北为正值,蓝框表示本研究的江淮地区范围)

Fig. 11 Spatial distributions of zonal (a,c) and meridional (b,d) water vapor flux anomalies (unit: kg/(m·s)) during the Meiyu period in cold (a, b) and warm (c, d) years
(The fluxes to the east and north are positive; The blue box represents the area of the YHRV)

4 总结与讨论

近年来江淮流域梅雨期降水变化趋于复杂,其变化对未来社会经济的发展有着重要意义。利用江淮地区及全球范围内的观测资料以及 CMIP5 中的 22 个耦合模式结果,分析了中国江淮流域梅雨期气候在过去、现在及未来的变化特征,主要结论如下:

(1) 总体而言,江淮地区冷年梅雨期气温偏低、降水偏少;暖年气温偏高、降水偏多。在全球变暖背景下,江淮地区梅雨期气温总体呈现显著的升高趋势,变化幅度较为明显(0.40℃/(10 a)),降水亦有相应的增加。就空间分布而言,全球变暖后,江淮地区梅雨期气温整体呈升高趋势,升高幅度由南向北递增;江淮地区梅雨期降水总体呈增加趋势,在北部部分地区有较微弱的减少趋势。

(2) CMIP5 模式对江淮地区梅雨期年平均气温和降水量模拟较好,很好地再现了江淮地区梅雨期气温和降水量的气候态分布特征。两种排放情景下江淮地区梅雨期气温和降水量相对现代而言都呈明显的上升趋势。气温的升高是整体性的,分布较为均匀,RCP8.5 情景下多模式集合的升温速率(0.45℃/(10 a))高于 RCP4.5 情景(0.23℃/(10 a)),至 21 世纪末期,RCP4.5 情景下江淮地区梅雨期气温相对现代而言平均升温 2.20℃;RCP8.5 情景下升温更为显著,达 4.30℃。江淮地区梅雨期降水在 RCP4.5 情景下多模式集合的变化速率(0.72 mm/(10 a))略高于 RCP8.5 情景(0.51 mm/(10 a)),在 RCP8.5 情景下的空间分布不均匀性高于 RCP4.5 情景。且随着时间的推移,两种排放情景下降水的空间分布不均匀性都在加剧:江淮地区南部降水减少的同时,北部降水明显增加。

(3) 亚洲夏季风是影响夏季降水最主要的环流系统,850 hPa 风场将中国南海和孟加拉湾的水汽输送至江淮地区,与江淮地区梅雨期降水有直接关联。暖年,削弱的南亚夏季风使得水汽得以输送至长江流域,与东亚夏季风的水汽在江淮地区汇合,共同造成了当年江淮地区气候偏湿,反之偏干。南

亚高压及西风急流的强弱及位置也与江淮地区的梅雨期降水相联系:暖年,南亚高压强度增强,副热带西风急流位置偏南偏强时,江淮地区普遍偏涝;反之,江淮地区普遍偏干。江淮地区的水汽主要由南亚季风的西风气流纬向输送,暖年南亚季风的纬向输送相对较强,当年气候偏湿;反之则偏干。由上述结果可见,与 RCP4.5 情景相比,在 RCP8.5 情景下,江淮地区梅雨期降水分布的空间不均匀性更为明显,这可能与极端降水发生的频次有关,应在未来对其机理做进一步的研究。另外,由于文中仅采用气温和降水作为研究对象,未对其他物理量的模拟效果做综合评价,因此对江淮地区梅雨期气候变化成因的研究还不够深入。未来拟在研究中加入季风指数、海温等因子进行综合分析,以期从机理方面对江淮地区梅雨期气候变化的成因作出更为全面系统的研究。

参考文献

陈菊英,程华琼,王威. 2007. 中国异常增暖来年江淮流域易发生大洪水. 地球物理学进展,22(4):1380-1385. Chen J Y, Cheng H Q, Wang W. 2007. The Chinese abnormal warming is important predictive sign of occurring torrential of rain and heavy floods in the Yangtze river valley or the Huai River bison in next summer. Progress Geophys, 22(4): 1380-1385 (in Chinese)

陈旭. 2015. 气候变暖背景下江淮梅雨由典型向非典型演变的统计特征及其成因分析[D]. 南京:南京信息工程大学. Chen X. A study on statistical characteristics of Meiyu turning from typical to atypical and its possible causes[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese)

丁一汇,柳俊杰,孙颖等. 2007. 东亚梅雨系统的天气-气候学研究. 大气科学,31(6):1082-1101. Ding Y H, Liu J J, Sun Y, et al. 2007. A study of the synoptic-climatology of the Meiyu system in East Asia. Chinese J Atmos Sci, 31(6): 1082-1101 (in Chinese)

公颖. 2004. 梅雨锋暴雨中尺度系统的模式试验和分析[D]. 南京:南京气象学院. Gong Y. 2004. The model experiment and analysis of the meso-scale systems in the course of Meiyu frontal rainstorm[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese)

龚道溢,朱锦红,王绍武. 2002. 长江流域夏季降水与前期北极涛动的显著相关. 科学通报,47(7):546-549. Gong D Y, Zhu J H, Wang S W. 2002. Significant relationship between spring AO and the summer rainfall along the Yangtze River. Chinese Sci Bull, 47(11): 948-951 (in Chinese)

胡娅敏,丁一汇,廖菲. 2008. 江淮地区梅雨的新定义及其气候特征. 大气科学,32(1):101-112. Hu Y M, Ding Y H, Liao F. 2008. A study of updated definition and climatological characters of Meiyu season in the Yangtze-Huaihe region. Chinese J Atmos Sci, 32(1): 101-112 (in Chinese)

胡娅敏,丁一汇. 2009. 2000 年以来江淮梅雨带北移的可能成因分析. 气象,35(12):37-43. Hu Y M, Ding Y H. 2009. Possible reasons for northward shift of Meiyu belt in Yangtze-huaihe river region during 2000-2005. Meteor Mon, 35(12): 37-43 (in Chinese)

梁萍,丁一汇,何金海. 2008. 长江下游夏季降水与东亚夏季风及春季太平洋海温的关系. 高原气象,27(4):772-777. Liang P, Ding Y H, He J H. 2008. Relations between summer rainfall over the lower reach of Yangtze river and East Asian summer monsoon as well as sea surface temperature over the Pacific in spring. Plateau Meteor, 27(4): 772-777 (in Chinese)

梁萍,丁一汇,何金海等. 2010. 江淮区域梅雨的划分指标研究. 大气科学,34(2):418-428. Liang P, Ding Y H, He J H, et al. 2010. A study of determination index of regional Meiyu over the Yangtze-Huaihe basin. Chinese J Atmos Sci, 34(2): 418-428 (in Chinese)

钱维宏,朱江,王永光等. 2009. 江淮梅雨和赤道太平洋区域海温变化的关系. 科学通报,54(1):79-84. Qian W H, Zhu J, Wang Y G, et al. 2009. Regional relationship between the Jiang-Huai Meiyu and the equatorial surface-subsurface temperature anomalies. Chinese Sci Bull, 54(1): 113-119

沈瑱,张耀存,肖卉等. 2011. BCC_AGCM2.0.1 模式系统对江淮梅雨期降水的模拟能力. 气象,37(11):1336-1342. Shen Z, Zhang Y C, Xiao H, et al. 2011. Ability of the model BCC_AGCM2.0.1 to reproduce Meiyu precipitation. Meteor Mon, 37(11): 1336-1342 (in Chinese)

司东,丁一汇,柳艳菊. 2009. 全球海气耦合模式(BCC_CM1.0)对江淮梅雨降水预报的检验. 气象学报,67(6):947-960. Si D, Ding Y H, Liu Y J. 2009. Evaluation of meiyu prediction in the Yangtze-Huaihe region by coupled ocean-atmosphere general circulation model (BCC_CM1.0). Acta Meteor Sinica, 67(6): 947-960 (in Chinese)

司东,丁一汇,柳艳菊. 2010. 中国梅雨雨带年代际尺度上的北移及其原因. 科学通报,55(1):68-73. Si D, Ding Y H, Liu Y J. 2010. Decadal northward shift of the Meiyu belt and the possible cause. Chinese Sci Bull, 54(24): 4742-4748 (in Chinese)

孙颖,丁一汇. 2009. 未来百年东亚夏季降水和季风预测的研究. 中国科学 D 辑:地球科学,39(11):1487-1504. Sun Y, Ding Y H. 2009. A projection of future changes in summer precipitation and monsoon in East Asia. Sci China Earth Sci, 53(2): 284-300 (in Chinese)

孙玉婷. 2014. 气候变暖背景下江淮梅雨带的变动及其与水汽输送的联系[D]. 南京:南京信息工程大学. Sun Y T. 2014. Changes in the Meiyu belt and its association with water vapor transport in terms of global warming[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese)

陶诗言，朱文妹，赵卫. 1988. 论梅雨的年际变异. 大气科学，12(S1)：13-21. Tao S Y，Zhu W M，Zhao W. 1988. Interannual variability of Meiyu rainfalls. Sci Atmos Sinica 12(S1)：13-21 (in Chinese)

吴蓉，张耀存. 2012. RegCM3 模式对江淮流域梅雨期降水和环流形势的模拟性能检验. 气象科学，32(2)：119-126. Wu R，Zhang Y C. 2012. Performance of RegCM3 in simulating the rainfall and associated circulation in Meiyu period of Yangtze and Huaihe river valleys. J Meteor Sci，32(2)：119-126 (in Chinese)

徐群. 2007. 121 年梅雨演变中的近期强年代际变化. 水科学进展，18(3)：327-335. Xu Q. 2007. Recent strong decadal change of Meiyu in 121 years. Adv Water Sci，18(3)：327-335 (in Chinese)

姚遥，罗勇，黄建斌. 2012. 8 个 CMIP5 模式对中国极端气温的模拟和预估. 气候变化研究进展，8(4)：250-256. Yao Y，Luo Y，Huang J B. 2012. Evaluation and projection of temperature extremes over China based on 8 modeling data from CMIP5. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis，8(4)：250-256 (in Chinese)

叶笃正，黄荣辉，王绍武等. 1996. 长江黄河流域旱涝规律和成因研究. 济南：山东科学技术出版社，387pp. Ye D Z，Huang R H，Wang S W，et al. 1996. Research on the Regularity and Cause of Droughts and Floodings in the Yangtze River Valley and the Yellow River Valley. Jinan：Shandong Science and Technology Press，387pp (in Chinese)

周曾奎. 1996. 江淮梅雨. 北京：气象出版社. Zhou Z K. 1996. Meiyu over the Yantze-Huaihe River Basin. Beijing：China Meteorological Press (in Chinese)

朱玉祥，丁一汇，徐怀刚. 2007. 青藏高原大气热源和冬春积雪与中国东部降水的年代际变化关系. 气象学报，65(6)：946-958. Zhu Y X，Ding Y H，Xu H G. 2007. The decadal relationship between atmospheric heat source of winter and spring snow over Tibetan Plateau and rainfall in East China. Acta Meteor Sinica，65(6)：946-958 (in Chinese)

Chen H P. 2013. Projected change in extreme rainfall events in China by the end of the 21st century using CMIP5 models. Chinese Sci Bull，58(12)：1462-1472

Feng S，Hu Q，Huang W，et al. 2014. Projected climate regime shift under future global warming from multi-model，multi-scenario CMIP5 simulations. Global Planet Change，112：41-52

Huang R H，Zhang R H，Zhang Q Y. 2000. The 1997/98 ENSO cycle and its impact on summer climate anomalies in East Asia. Adv Atmos Sci，17(3)：348-362

IPCC. 2007. Climate Change 2007：The Physical Science Basis：Working Group Ⅰ Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge，United Kingdom and New York，USA：Cambridge University Press

IPCC. 2013. Summary for policymakers // Stocker T F，Qin D，Plattner G K，et al. Climate Change 2013：The Physical Science Basis：Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge，United Kingdom and New York，USA：Cambridge University Press

Jiang D B，Tian Z P. 2013. East Asian monsoon change for the 21st century：Results of CMIP3 and CMIP5 models. Chinese Sci Bul，58(12)：1427-1435

Meehl G A，Covey C，Delworth T，et al. 2007. The WCRP CMIP3 multimodel dataset：A new era in climate change research. Bull Amer Meteor Soc，88(9)：1383-1394

Moss R H，Edmonds J A，Hibbard K A，et al. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature，463(7282)：747-756

Murakami T. 1959. The general circulation and water vapor balance over the far East during the rainy season. Geophys Mag，29(2)：131-171

Serrano A，Mateos V L，Garcia J A. 1999. Trend analysis of monthly precipitation over the iberian peninsula for the period 1921－1995. Phys Chem Earth B，24(1-2)：85-90

Taylor K E，Stouffer R J，Meehl G A. 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design. Bull Amer Meteor Soc，93(4)：485-498

Trenberth K. 2005. Uncertainty in hurricanes and global warming. Science，308(5729)：1753-1754

Wei F Y，Zhang T. 2009. Oscillation characteristics of summer precipitation in the Huaihe River valley and relevant climate background. Sci China Earth Sci，2010，53(2)：301-316

Xie Y K，Liu Y Z，Huang J P. 2016. Overestimated Arctic warming and underestimated Eurasia mid-latitude warming in CMIP5 simulations. Int J Climatol，36(14)：4475-4487

Zhang R H，Sumi A，Kimoto M. 1999. A diagnostic study of the impact of El Ni? o on the precipitation in China. Adv Atmos Sci，16(2)：229-241

Zhu X，Wu Z，He J. 2008. Anomalous Meiyu onset averaged over the Yangtze River valley. Theor Appl Climatol，94(1-2)：81-95